بررسی نقش مصرف نانوسیلیس در بتن بر عملکرد زیست‌محیطی و اقتصادی آن★

محمدرضا صبور [۱]		مینا یکه‌لر [۲]		مرتضی نیکروان [۳]

چکیده *بتن از پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی در جهان محسوب می‌شود و نانوسیلیس به‌علت طبیعت پوزولانی بالا، برای استفاده در بتن مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، مطالعه‌ی عملکرد زیست‌محیطی آن ضروری به نظر می‌رسد. در این مطالعه برای بررسی کارآمدی بتن حاوی نانوسیلیس و مقایسه‌ی آن با بتن متعارف از روش ارزیابی زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر استفاده شده است. هم‌چنین طبق توصیه‌ی ASTM از روش ارزیابی اقتصادی چرخه‌ی عمر به‌منظور ارزیابی اقتصادی بهره گرفته شده است. در پایان نیز با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند شاخصه، نتایج ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی به‌منظور نتیجه‌گیری تلفیق شده‌اند. در این مطالعه کاهش اثرات زیست‌محیطی در شاخص گرمایش جهانی و مصرف سوخت‌های فسیلی در صورت جایگزینی ۱/۵٪ نانوسیلیس با سیمان، به‌ترتیب به‌میزان ۲۶/۰۵ و ۱۰/۸۸ درصد به‌دست آمد. نتایج ارزیابی اقتصادی نیز نشان داد که جایگزینی ۱/۵٪ نانوسیلیس در بتن، هزینه‌ی چرخه‌ی عمر بتن را در حدود ۱۰ درصد کاهش می‌دهد. نمرات ارزیابی تلفیقی دو سناریو نیز به‌ترتیب ۵۲/۸ و ۴۷/۶ به‌دست آمد.*

واژه‌های کلیدی بتن، نانوسیلیس، ارزیابی زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر، شاخص گرمایش جهانی، شاخص مصرف سوخت فسیلی، ارزیابی اقتصادی چرخه‌ی عمر.

Investigation of Effect of Nano-SiO_2Consumption in Concrete on its Environmental and Economic Functions

M.R. Sabour		M. Yekkalar		M. Nikravan

Abstract *Concrete is one of the most utilized construction materials in the world. Nowadays, Nano silicate usage due to its special property attracted considerable attention. On this basis, studying its environmental functions is an essential issue. Accordingly, the behavior of normal concrete and the one with Nano silicate were compared via taking advantage of Life Cycle Assessment (LCA) method in this investigation. In addition, due to ASTM recommendation, the abovementioned method was utilized to compare these two concrete mixtures economically, too. Concluding the outcomes, the economic and environmental assessments were mixed via multi-criteria decision-making method. Reducing environmental impacts via substitution of cement with 1.5% Nano silicate, global warming criterion and fossil fuel consumption have been reduced 26.5 and 10.88 percent, respectively. Having the same substitution in concrete production, economic assessment indicates 10% reduction in life cycle expenses for this mixture. The mixture assessments for both normal and mixture with Nano silicate concrete ranked them 47.6 and 52.8, respectively*.

Key Words: Concrete, Nano silicate, Environmental Life Cycle Assessment, Global Warming Criterion, Fossil Fuel Consumption Criterion, Economical Life Cycle Assessment

---

★تاریخ دریافت مقاله ۹۰/۹/۱۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۳/۲۸ می‌باشد.

(۱) استادیار، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

(۲) نویسنده‌ی مسؤول، کارشناس ارشد عمران- محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

(۳) کارشناس ارشد عمران- محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

مقدمه

بـر اثـر توسـعه‌ی سـریع صـنعت سـاختمان و رشـد تصاعدی گستره‌ی سـاخت و سـاز، بـه‌تـدریج تبعـات دخالت‌های بی‌حد و مرز انسان در محیط زیست نمایان شد و متعاقب آن تلاش برای حفظ شرایط زنـدگی بـر روی کره زمین آغاز شد[۱]. در راستای این تـلاش‌هـا، مفهوم «توسـعه‌ی پایـدار» از سـوی کمیسـیون جهـانی محـیط‌زیسـت و توسـعه بـه‌معنـای بـرآورده کـردن احتیاجات نسل حاضـر بـدون وارد سـاختن لطمـه بـه توانایی‌های نسل آتی در تـأمین نیازهـای خـود، مـورد توجه قرار گرفت [۲]. نتـایج چنـین ملاحظـاتی ظهـور نگرشی بود که در آن انتخاب مصالح با در نظر گـرفتن سازگاری با محیط‌زیست صورت پذیرد.

مهم‌ترین عـوارض زیسـت‌محیطـی صـنعت بـتن مربوط به تولید سیمان است. از ایـن رو، کـاهش عیـار سیمان و افزایش دوام دو موضوع اساسی اسـت کـه از جمله سرفصل‌های مبحث «بتن و توسعه‌ی پایدار» تلقی می‌گردد [۲]. به هر میزان که مقاومت و دوام سازه‌هـای بتنی افزایش یابد، از یک سو مصرف مواد خام و منـابع طبیعی کاهش خواهـد یافـت و از سـوی دیگـر سـبب کاهش حجم نخاله‌های ساختمانی در بازه‌هـای زمـانی طولانی خواهد شد.

یکی از بهترین راهکارها درخصوص بهبود خواص بتن ازدیدگاه زیست‌محیطی،یافتن جایگزین‌هـای مناسـب بـرای سـیمان مصـرفی در بـتن اسـت. در ایـن میـان، پوزولان‌ها که از دیـر بـاز بـه‌عنـوان جـایگزین و مکمـل سیمان در ساخت و سازها مورد اسـتفاده قرارگرفتـه‌انـد، می‌توانند مشکلات مربـوط بـه محـدودیت تولیـد را تـا میزان زیادی حل نمایند. پوزولان‌ها توانسته‌اند از طریـق جایگزینی با سیمان ضمن صرفه‌جویی در مصرف انـرژی مورد نیاز در تولید سـیمان و کـاهش انتشـارات آلاینـده، مقاومت فشاری و دوام آن‌ها را نیز افزایش دهنـد [۶-3]. با ظهـور فنـاوری نـانو، نـانوسـیلیس بـه‌عنـوان یکـی از نانوذرات مهم با خاصیت پوزولانی بالا در بتن‌هـایی کـه به مقاومت بالا در برابر خوردگی و سـایش نیـاز داشـته باشد، و یا در مواردی که نیاز به استفاده از بـتن‌هـایی بـا نفوذپذیری کم باشد، مورد استفاده قرار گرفت. از جملـه این کاربری‌ها به موارد زیر می‌توان اشاره کرد [۳]:

۱- اجرای بتن سدها، کانال‌ها، تونل‌هـا و... در منـاطقی با خطر خوردگی.

۲- ساخت بـتن‌هـایی بـا مقاومـت بـالا بـرای سـاخت فرودگاه‌ها و آسمان‌خراش‌ها.

۳- ساخت بتن سدها، کانال‌ها، تونل‌ها، مخازن و منابع آب.

در کنـار بهبـود مشخصـات فنـی بـتن حـاوی نانوسـیلیس در مقایسـه بـا بـتن‌هـای متعـارف، اظهـار نظرهایی کلی در ارتباط با کاهش آثـار زیسـت‌محیطـی تولید بتن حاوی این نانو ذرات شده است. این امـر بـه دلیل افزایش مقاومت و دوام چنین بتنی از یـک سـو و کاهش نیاز به تولید و مصـرف سـیمان از سـوی دیگـر بوده است [۳]. اما زمانی می‌توان ادعا کرد کـه مصـرف نانوسـیلیس در بـتن موجـب کـاهش اثـرات سـوء زیست‌محیطی شـده و مصـرف آن را در مقیـاس انبـوه توصـیه نمـود کـه آثـار زیسـت‌محیطـی فرآینـد تولیـد نانوذرات سیلیس نیز وارد ارزیابی‌ها بشود و علاوه بـر آن میزان بهبود عملکرد زیست‌محیطی و اقتصادی ایـن جایگزینی قابل‌توجه باشد، چرا که خطرات سمی بالقوه نـانوذرات، موضـوعی اسـت کـه بـا وجـود مزایـای زیست‌محیطی و صرفه‌جویی اقتصادی قابل چشم‌پوشی نمی‌باشد [7].

هدف این مطالعه مقایسه‌ی ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی بتن متعارف و بتن حاوی نانو ذرات سیلیس به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان با اسـتفاده از روش ارزیابی زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر است. بدین منظور از روش ارزیابی زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر به‌عنـوان یک روش استاندارد بـین‌المللـی و ابـزاری نیرومنـد در مطالعات زیست‌محیطی بهره گرفتـه شـده اسـت. ایـن روش، ورودی‌ها و خروجی‌های بالادستی و پایین‌دستی یک سیستم را متناسب با چرخه‌ی عمر محصـولات یـا فرآیندها مورد تجزیه و تحلیل قـرار مـی‌دهـد. در ایـن روش، تمام چرخه‌ی عمر یک محصول مـد نظـر قـرار می‌گیرد و آثار سوء بالقوه‌ی متناسـب بـا ایـن مراحـل،

به‌صورت کمی بیان می‌گردد [8].

مواد و روش‌ها

ارزیابی زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر (Life Cycle Assessment)

LCA از چهار مرحله‌ی اصلی تشکیل شده است: ۱) تعریف اهداف و مرزهای سیستم، ۲) تهیه‌ی فهرست چرخه‌ی عمر، ۳) ارزیابی اثرات و ٤) تفسیر نتایج [8].

بر اساس استاندارد ISO 14040، اولین مرحله تعریف اهداف و قلمرو مطالعات است. موارد عمده‌ای که در این مرحله بدان پرداخته می‌شود شامل تعریف اهداف اصلی، انتخاب واحد عملیاتی، تشریح آن و تعیین قلمرو مطالعات است. در این مقاله با تعیین ساخت یک متر مکعب بتن برای مصرف در سازه‌ای با عمر بهره‌برداری ۵۰ سال، به‌عنوان واحد عملیاتی، به تشریح سناریوها و مرزبندی سیستم مورد مطالعه پرداخته می‌شود. سیستم مورد مطالعه در این تحقیق در برگیرنده‌ی انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف انرژی در واحدهای مختلف فرآیند تولید نانوسیلیس و سیمان مصرفی در بتن و نقش آن در طراحی و دوران بهره‌برداری است.

در سناریوی اول آثار زیست‌محیطی بتن متعارف ساخته شده از سیمان پرتلند و فاقد نانوسیلیس، و در سناریوی دوم، بتن حاوی ۱/۵٪ نانوسیلیس به‌عنوان مواد سیمانی جایگزین مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

مرحله دوم از مطالعات LCA، تهیه‌ی فهرست چرخه‌ی عمر است. این مرحله زمان‌گیرترین بخش کار است و پایه‌ی محاسبات در مراحل بعدی را تشکیل می‌دهد. در این مرحله برای تهیه‌ی فهرست چرخه‌ی عمر، ورودی‌ها به‌صورت میزان مصرف مواد خام، سوخت و انرژی الکتریکی و خروجی‌ها نیز به فرم انتشارات در هوا، به‌ازای واحد عملیاتی انتخاب شده در مرحله‌ی قبل، تعیین می‌گردند. دسته‌های اثرات نیز به‌همراه آلاینده‌های مربوط و اثرات محتمل مطابق جدول (۱) طبقه‌بندی می‌شوند و سپس اقدام به تهیه‌ی فهرست چرخه‌ی عمر می‌گردد.

داده‌های مورد نیاز در این مرحله، با استفاده از آزمایش‌های میدانی، فرمول‌های تجربی، اطلاعات به‌دست آمده از تولیدکننده و یا سایر مطالعات انجام شده در محدوده‌ی مورد مطالعه یا مناطق مشابه، به‌دست خواهد آمد. در این پژوهش نیز داده‌های مورد نیاز، از اطلاعات حاصل از نتایج میدانی انتشارات آلاینده‌ها و مصرف انرژی شرکت سیمان سپاهان که توسط محققان قبلی [۳] و [10] و هم‌چنین شرکت سوئدی Akzonobel (این نانوسیلیس در شماری از مطالعات صورت گرفته در ایران [۳] و [٤] مصرف شده است) صورت گرفته استفاده شده است.

جدول ۱ دسته‌های اثرات به‌همراه آلاینده‌های مربوط و اثرات محتمل [9]

دسته آثار با سطح تأثیر جهانی	آلاینده‌ها	محیط انتشار	آثار زیست‌محیطی
گرمایش جهانی	CO_2 CH_4 N_2O CO CFC-11	هوا	●افزایش گرمایش تشعشعی ●اثرات سوء بر سلامتی انسان ●نابودی محصولات کشاورزی ●اثرات سوء بر اکوسیستم
مصرف انرژی	گازطبیعی دیزل انرژی الکتریکی ...	ـــ	●کاهش منابع تجدیدناپذیر ●افزایش هزینه‌های مصرف‌کنندگان ●انتشار گازهای گلخانه‌ای

پس از تعیین میزان ورودی‌ها و غلظت خروجی‌ها در مرحله‌ی دومLCA، اثرات مربوط در مرحله‌ی سوم کمی می‌شوند. در این مطالعه دسته‌های اثرات به‌دلایل محدودیت داده‌های به‌دست آمده، عدم قطعیت در سرنوشت نهایی برخی از مواد و نحوه‌ی انجام ارزیابی آثار این آلاینده‌ها، به آثار جهانی اصلی شامل آثار گرمایش جهانی و مصرف انرژی [9] محدود شده است. در راستای کمی کردن پدیده‌ی گرمایش جهانی، سازمان حفاظت از محیط زیست امریکا (US.EPA) معیاری به‌عنوان توانایی گرمایش جهانی (GWP) تعریف کرده است. طبق این تعریف توانایی یک ماده در گرمایش جهانی عبارتست از مقدار گاز گلخانه‌ای وارد شده به محیط‌زیست در طول چرخه‌ی عمر آن ماده. برای کمی کردن اثر مصرف سوخت فسیلی نیز مقدار انرژی لازم برای بازسازی ۱ کیلوگرم از هر یک از انواع سوخت‌های فسیلی به‌عنوان FP_i در نظر گرفته شده است [11]. تعاریف فوق مطابق (۱) و (۲) بیان می‌شود:

$$\text{توانایی گرمایش جهانی} = \sum_i m_i \times GWP_i \quad (۱)$$

$$\text{شاخص مصرف سوخت‌های فسیلی} = \sum_i c_i \times FP_i \quad (۲)$$

که در آن i تعداد جریان‌های لازم برای تولید آن ماده، m_i جرم ماده‌ی تولیدی بر حسب گرم و GWP_i توانایی در گرمایش جهانی توسط جریان i بر حسب کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل، c_i میزان سوخت مصرفی جریان i بر حسب کیلوگرم و FP_i مقدار انرژی لازم برای بازسازی سوخت i بر حسب مگاژول بر کیلوگرماست. مقادیر GWP_i و FP_i نیز به‌ترتیب در جداول (۲) و (۳) آورده شده است.

جدول ۲ پتانسیل گرمایش جهانی جریان‌های مختلف [11]

جریان (i)	GWPi (دی‌اکسید کربن معادل)
دی اکسید کربن	۱
متان	۲۳
اکسید نیتروژن	۲۹۶

جدول ۳ توانایی در مصرف سوخت‌های فسیلی [11]

جریان (i)	FPi(MJ/kg)
زغال سنگ	۰/۲۵
گاز طبیعی	۷/۸۰
نفت خام	٦/۱۲

برای استفاده از نتایج ارزیابی زیست‌محیطی باید نتایج به معیار واحدی تبدیل شوند. نرمال‌سازی این اثرات با استفاده از روش‌های مورد استفاده EPA، مطابق (۳) انجام خواهد گرفت [11].

$$IAScore_{jk} = \left(\frac{IA_{jk} \times IVwt_k}{Norm_k}\right) \times 100 \quad (۳)$$

که در آن $IAScore_{jk}$ مقدار نرمال شده‌ی اثر k در سناریوی j، IA_{jk} مقدار اثر k در سناریوی j، $IVwt_k$ میزان اهمیت اثر k و $Norm_k$ مقادیر نرمال‌سازی برای اثر k مطابق مقادیر جدول (٤) است.

جدول ٤ مقادیر ضرایب نرمال‌سازی اثرات مختلف زیست‌محیطی [11]

اثر	معیار	واحد	ضریب نرمال‌سازی
گرمایش جهانی	CO_2	گرم	۲۵۵۸۲٦٤۰/۰۹
مصرف سوخت فسیلی	MJ	مگاژول	۳۵۳۰۹/۰۰

مرحله‌ی پایانی ارزیابی تفسیر نتایج و نتیجه‌گیری است. نتایج حاصل از مراحل دوم و سوم در راستای اهداف تعیین شده در مرحله‌ی اول، تفسیر می‌شود و سناریو از نقطه‌نظر زیست‌محیطی مورد قضاوت قرار می‌گیرد. علاوه برآن، مواردی که بیشترین اثرات منفی را دارند، مشخص می‌گردند و نسبت به اصلاح آن‌ها اقدام می‌شود.

ارزیابی اقتصادی چرخه‌ی عمر (Life-Cycle Cost)

تجربه نشان داده است که سازگاری مناسب مصالح

جدید ساختمانی با محیط‌زیست اگرچه برای استفاده از آن در صنعت لازم است ولی کافی نیست و در صورت عدم توجیه اقتصادی مناسب، امید چندانی به استفاده‌ی وسیع از آن ماده وجود نخواهد داشت. بدین منظور عموماً در کنار ارزیابی‌های زیست‌محیطی، ارزیابی اقتصادی نیز هر چند به‌صورت اجمالی انجام می‌شود. در این مطالعه برای مدل کردن اثرات اقتصادی با استفاده از استاندارد ASTM (E917)، از روش LCC، بهره گرفته شده است. در این روش کل هزینه‌ها مطابق رابطه‌ی (٤) به سال مبدأ تبدیل می‌گردند و با هم جمع می‌شوند تا نتیجه به‌عنوان معیار اقتصادی در نظر گرفته شود. در این رابطه LCC_j کل هزینه‌ی چرخه‌ی عمر، C_t مجموع هزینه‌های مربوط به سال t، N تعداد سال‌های مطالعه و d نرخ نزول ارزش پول است [10] که با توجه به آمار موجود در بانک مرکزی برابر ۰/۱۲ در نظر گرفته شده است.

$$LCCj = \sum_{t=0}^{N} \frac{C_t}{(1+d)^t} \qquad (٤)$$

ارزیابی تلفیقی زیست‌محیطی و اقتصادی (Overall Performance)

در این مرحله دو بعد محیط‌زیست و اقتصاد با یکدیگر تلفیق شده‌اند تا بتوان از آن به‌عنوان معیاری در تصمیم‌گیری استفاده کرد. روش معمول در این زمینه، تصمیم‌گیری چند شاخصه (MADA) است، که بر وزن‌دهی به هر کدام از ابعاد محیط زیست–اقتصاد بستگی دارد، بنابراین اولین کار تعریف وزن برای هر یک از ابعاد است. معمول‌ترین نوع وزن‌دهی، مطابق با استاندارد ASTM (E1765)، تقسیم عدد ۱۰۰ بین ابعاد لازم برای مدل‌سازی است. سپس با استفاده از رابطه‌ی (۵) از وزن‌های داده شده، عددی به‌عنوان نمره‌ی ارزیابی تلفیقی زیست‌محیطی اقتصادی به‌دست می‌آید [11].

$$Score_j = \left(EnvWt \times \frac{EnvScore_j}{\sum_{j=1}^{n} EnvScore_j} + EconWt \times \frac{LCC_j}{\sum_{j=1}^{n} LCC_j} \right) \times 100 \qquad (۵)$$

در رابطه‌ی فوق $Score_j$ نمره‌ی ارزیابی تلفیقی سناریو j، EnvWt وزن بعد زیست‌محیطی، EconWt وزن بعد اقتصادی، LCC_j کل هزینه‌ی چرخه‌ی عمر سناریو j، $EnvScore_j$ نمره‌ی ارزیابی زیست‌محیطی سناریو j (مجموع مقادیر نرمال شده‌ی اثرات زیست-محیطی مورد بررسی در سناریو j) و n تعداد سناریوها است. بدیهی است مصالحی که مقدار کمتری از رابطه را به‌دست آورند، گزینه مناسب‌تری است.

نتایج و بحث

ارزیابی زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر

با استناد به مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفته برای درصد جایگزینی نانوسیلیس، درصدی از مصرف نانوسیلیس که جوابگوی الزامات فنی شامل مقاومت فشاری و دوام سازه باشد، انتخاب شده و مبنای محاسبات قرار داده می‌شود. در این راستا طرح اختلاط حاوی ۱/۵ درصد نانوسیلیس، مطابق نتایج آزمایش‌های صورت گرفته در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ارزیابی خواهد شد [۳]. جزئیات طرح اختلاط سناریوهای اول و دوم در جدول (۵) آورده شده است.

جدول ۵ طرح اختلاط‌های مورد استفاده در دو سناریو [۳]

	کد طرح	w/c	مقدار سیمان (Kg/m^3)	مقدار نانوسیلیس (Kg/m^3)	مقدار سنگدانه (Kg/m^3)	مقدار آب (Kg/m^3)
سناریو ۱	OPC*	۰/٤۵	٤۰۰	–	۱۷۰۳	۱۸۰
سناریو ۲	$NS_{1.5}$**	۰/٤۵	۳۹٤	٦	۱٦۹٦	۱۸۰

*OPC (Ordinary Portland Cement): بتن متداول ساخته شده از سیمان پرتلند

**$N_{1.5}$: بتن حاوی ۱/۵ درصد نانوسیلیس جایگزین سیمان

ارزیابی زیست‌محیطی دو سناریو در فرآیند تولید. مطابق داده‌های به‌دست آمده از نتایج میدانی محققان قبلی برای شرکت سیمان سپاهان [۱۲]، شرکت سوئدی اکزونوبل [13]، ترازنامه انرژی و طرح اختلاط بتن در دو سناریو، میزان مصرف انرژی و انتشارات حاصل در فرآیند تولید دو سناریو مطابق جداول (٦) و (٧) به‌دست آمد:

جدول ٦ میزان انرژی مصرفی در سال مبدأ

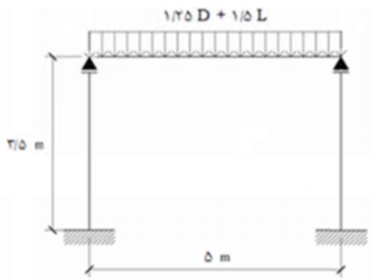
	سناریوی اول	سناریوی دوم
انرژی الکتریکی (kwh/m^3)	٤٣	٥١/٨٤
انرژی حرارتی ($kcal/m^3$)	۳۱۱/٥	۳۰۸/۳٦

جدول ۷ میزان انتشارات در فرآیند تولید در سال مبدأ (kg/m^3)

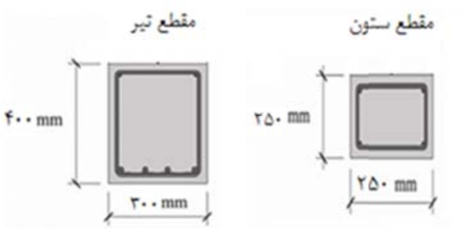
	سناریوی اول	سناریوی دوم
CO_2	۳٦۳/۸٦	۳٦۳/٤٦
CO	۰/۱۹	۰/۱۹
NO_x	۰/۹۲	۰/۸۸
CH_4	$۲/٦۸\times۱۰^{-۳}$	$۲/٦۷\times۱۰^{-۳}$
N_2O	$۰/٤٥\times۱۰^{-۳}$	$٤/۳\times۱۰^{-٤}$
SO_x	۰	$۲/۲\times۱۰^{-٤}$

ارزیابی زیست‌محیطی دو سناریو در مرحله‌ی طراحی. همان‌گونه که اشاره شد، به‌کارگیری نانوسیلیس در بتن، افزایش مقاومت فشاری بتن را به‌همراه دارد. با افزایش مقاومت، مصرف بتن برای تحمل یک بار مکانیکی مشخص کاهش می‌یابد. میزان مقاومت فشاری بتن مورد مطالعه در سناریوی اول و دوم مطابق با کار صورت گرفته توسط اردستانی و همکاران به‌ترتیب برابر ٤٥/۱ مگا پاسکال و ٤۹/۷ مگا پاسکال بوده است که حاکی از بهبود ۱۰ درصدی مقاومت فشاری بتن حاوی نانوسیلیس در مقایسه با بتن متعارف می‌باشد [۳].

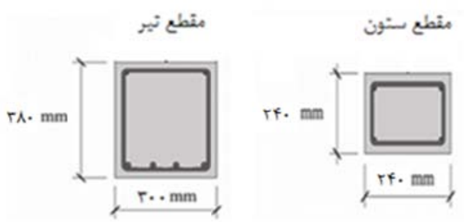
برای بررسی میزان تغییر ابعاد سازه با در نظر گرفتن افزایش مقاومت فشاری بتن در صورت به‌کارگیری نانوسیلیس، در ابتدا با توجه به کاربری سازه مطابق شکل (۲)، به تحلیل یک قاب، تحت بارهای مرده شامل وزن تیر و ستون و بار زنده‌ی ثابت، بر اساس آئین‌نامه‌ی بارگذاری ایران پرداخته شده و سپس با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در سناریو اول و دوم، مقاطع مطابق آئین‌نامه‌ی بتن ایران (آبا)، با دو طرح اختلاط متعارف و طرح حاوی نانوسیلیس، محاسبه شده است. نتایج محاسبات حاصل از تحلیل مقاطع در دو سناریو، در شکل (۲) قابل مشاهده است:



شکل ۱ نمای یک تیر و ستون



(الف)



(ب)

شکل ۲ الف) ابعاد مقاطع سناریوی اول، ب) ابعاد مقاطع سناریوی دوم

بدین ترتیب با محاسبه‌ی حجم بتن مصرفی در قاب ساخته شده از طرح اختلاط اول و قاب ساخته شده از طرح اختلاط حاوی نانوسیلیس و مقایسه‌ی میزان حجم بتن مصرفی در هر دو حالت، ضریبی

تحت عنوان ضریب کاهش مصرف بتن (R_c) قابل تعریف است. با در دست داشتن این ضریب، میزان کاهش اثرات زیست‌محیطی به‌دلیل کاهش مصرف بتن در مرحله‌ی طراحی محاسبه خواهد شد که بر پایه‌ی نتایج حاصل، ضریب کاهش مصرف برابر با ۰/۹۳۸ به‌دست آمد. تأثیر ضریب R_c در میزان انرژی مصرفی و انتشار آلاینده‌ها در جداول (۸) و (۹) قابل مشاهده است. شایان ذکر است، از آن‌جا که آرماتور مصرفی برای هر دو سناریو مقدار یکسانی به‌دست آمد، بنابراین اثرات زیست‌محیطی تولید آرماتور مصرفی وارد چرخه‌ی عمر نمی‌گردد.

جدول ۸ میزان انرژی مصرفی در فرآیند تولید و طراحی

	سناریوی اول	سناریوی دوم
انرژی الکتریکی (kwh/m^3)	٤٣	٤٨/٦٢
انرژی حرارتی ($kcal/m^3$)	٣١١/٥	٢٨٩/٢٤

جدول ۹ میزان انتشارات در فرآیند تولید و طراحی (kg/m^3)

	سناریوی اول	سناریوی دوم
CO_2	٣٦٣/٨٦	٣٤٠/٩٢
CO	٠/١٩	٠/١٧٨
NO_x	٠/٩٢	٠/٨٢٥
CH_4	$٢/٦٨\times١٠^{-٣}$	$٢/٥\times١٠^{-٣}$
N_2O	$٠/٤٥\times١٠^{-٣}$	$٤/٠٣\times١٠^{-٤}$
SO_x	٠	$٢/٠٦\times١٠^{-٤}$

ارزیابی زیست‌محیطی دو سناریو در دوران بهره‌برداری. یکی دیگر از اهداف به‌کارگیری نانوسیلیس در بتن افزایش دوام بتن حاصل، یا به‌عبارتی بهبود عملکرد بتن در دوران بهره‌برداری و کاهش نیاز به تعمیرات است. در این تحقیق، بر اساس مطالعه‌ی انجام گرفته در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی توسط اردستانی و همکاران مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید، به‌عنوان شاخص دوام در نظر گرفته شد، چرا که مهم‌ترین عاملی که دوام سازه‌های بتنی را در حاشیه‌ی سواحل تهدید می‌کند، نفوذ یون کلرید می‌باشد [۳]. با داشتن ضریب انتشار یون کلرید داخل بتن و با فرض برخی پارامترها، با استفاده از نرم‌افزارهایی چون نرم‌افزار Dura-P-Gulf که توسط انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران تهیه شده‌است، می‌توان تخمینی از عمر مفید سازه‌ی بتنی به‌دست آورد.

نتایج آزمایش نفوذ یون کلرید و عمر مفید نمونه‌ها در دو سناریو در جدول (۱۰) نشان داده شده است. نتایج حاکی از بهبود عملکرد بتن حاوی نانوسیلیس در مقایسه با بتن متعارف است:

جدول ۱۰ نتایج آزمایش نفوذ یون کلر و مقادیر عمر مفید سازه‌ی بتنی متناظر با هر یک از مخلوط‌های بتنی [۳]

کد طرح	ضریب انتشار (m^2/s)	کلرید سطحی (٪)	عمر مفید (سال)
OPC	$٦/٩٥\times١٠^{-١٢}$	١/٨	٢٠
$NS_{1.5}$	$٥/٦٥\times١٠^{-١٢}$	١/٦	٢٥

هر چه دوام سازه‌ی بتنی بیشتر باشد، میزان تخریب و نوسازی آن کمتر خواهد بود؛ در این تحقیق عمر مفید سازه‌ی بتنی ۵۰ سال در نظر گرفته شده است، لذا با توجه به مقادیر مربوط به عمر مفید سازه‌ها، تعداد مراتب تخریب و نوسازی مورد نیاز در یک دوره‌ی ۵۰ ساله در سناریوی اول و دوم به‌ترتیب ۲/٤٦ و ۱/۹٤ مرتبه خواهد شد. بنابراین آثار زیست‌محیطی محاسبه شده در سناریوی اول و دوم در دوره‌ی ۵۰ ساله‌ی بهره‌برداری به همین میزان افزایش خواهد یافت که نتایج آن در جداول (۱۱) و (۱۲) آورده شده است.

جدول ۱۱ میزان انرژی مصرفی در فرآیند تولید و طراحی و بهره‌برداری

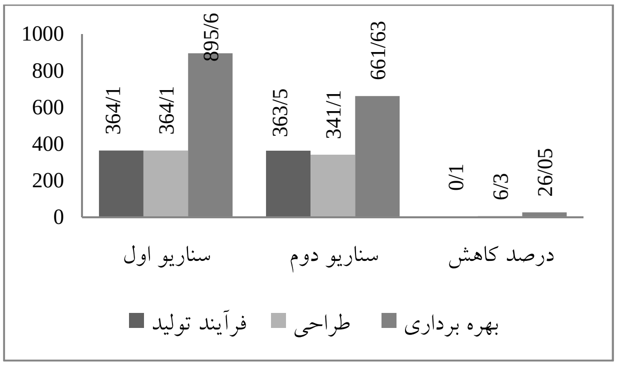
	سناریوی اول	سناریوی دوم
انرژی الکتریکی (kwh/m^3)	١٠٥/٧٨	٩٤/٣٢
انرژی حرارتی ($kcal/m^3$)	٧٦٦/٢٤	٥٦١/١٢

جدول ۱۲ میزان انتشارات در فرآیند تولید، طراحی و بهره‌برداری (kg/m^3)

	سناریوی اول	سناریوی دوم
CO_2	۸۹۵/۱	۶۶۱/۳۸
CO	۰/۴۷	۰/۳۴
NO_x	۲/۲۶	۱/۶
CH_4	$۶/۶\times ۱۰^{-۳}$	$۴/۸۵\times ۱۰^{-۳}$
N_2O	$۱/۱\times ۱۰^{-۳}$	$۸/۳۴\times ۱۰^{-۴}$
SO_x	۰	$۳/۹۹\times ۱۰^{-۴}$

در مرحله‌ی بعدی با توجه به مقادیر به‌دست آمده برای مصرف انرژی و میزان انتشارات به محاسبه‌ی شاخص گرمایش جهانی و شاخص کاهش سوخت فسیلی مطابق روابط ذکر شده، پرداخته می‌شود. نتایج و میزان درصد کاهش اثرات بررسی شده در سه مرحله‌ی تولید، طراحی و بهره‌برداری در نمودار (۱) و (۲) آورده شده است:

با توجه به نتایج به‌دست آمده همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مصرف ۱/۵٪ نانوسیلیس به‌عنوان مواد سیمانی جایگزین در بتن‌های متعارف، در مرحله‌ی تولید، شاخص گرمایش جهانی را به میزان ۰/۱۴ درصد کاهش می‌دهد که این کاهش چندان چشمگیر نمی‌باشد. اما شاخص مصرف سوخت فسیلی ۱۹/۸۱ درصد افزایش می‌یابد که دلیل این افزایش را می‌توان با میزان مصرف بالای انرژی الکتریکی در فرآیند تولید نانوسیلیس توضیح داد.



نمودار ۱ مقایسه‌ی ارزیابی زیست‌محیطی سناریوی اول و دوم در شاخص گرمایش جهانی ($kg\ of\ CO_2$)



نمودار ۲ مقایسه‌ی ارزیابی زیست‌محیطی سناریوی اول و دوم در شاخص مصرف سوخت فسیلی (MJ)

(علامت منفی نشان‌دهنده‌ی افزایش اثرات است)

در مرحله‌ی طراحی سازه نیز شاخص گرمایش جهانی به‌میزان ۶/۳ درصد کاهش یافته در حالی‌که شاخص مصرف سوخت فسیلی به‌میزان ۱۲/۳۳ درصد افزایش یافته است. بنابراین میزان اثرات زیست‌محیطی در شاخص گرمایش جهانی در مقایسه با مرحله‌ی تولید کاهش یافته که این موضوع را می‌توان با افزایش مقاومت فشاری در سناریوی دوم و در نتیجه مصرف کمتر بتن توضیح داد. اما هم‌چنان به‌دلیل مصرف بالای انرژی در تولید نانوسیلیس، شاخص مصرف سوخت فسیلی افزایش یافته است. بنابراین می توان اشاره نمود از دیدگاه زیست‌محیطی، مصرف نانوسیلیس در بتن در یک بازه‌ی زمانی کوتاه‌مدت، با تکیه بر نتایج به‌دست آمده، از منظر زیست‌محیطی توصیه نمی‌گردد.

با بررسی اثرات زیست‌محیطی دو سناریو در دوره‌ی ۵۰ ساله بهره‌برداری این کاهش درصد اثرات به‌صورت چشمگیری افزایش یافته است، که در مورد شاخص گرمایش جهانی این مقدار برابر با ۲۶/۰۵ درصد و برای شاخص مصرف سوخت‌های فسیلی این مقدار ۱۰/۸۸ درصد به‌دست آمده است.

از آن‌جا که برای انجام یک مطالعه‌ی همه جانبه باید عملکرد زیست‌محیطی محصول را تا پایان دوره‌ی بهره‌برداری آن مورد مطالعه قرار داد، بنابراین در تحلیل و تفسیر داده‌ها، نتایج مربوط به پایان دوره‌ی بهره‌برداری ملاک ارزیابی قرار می‌گیرد. بر این اساس میزان شاخص گرمایش جهانی و شاخص مصرف سوخت‌های فسیلی به‌ترتیب برابر ۲۶/۰۵ و ۱۰/۸۸ درصد خواهد شد.

ارزیابی اقتصادی

برای ارزیابی اقتصادی در ابتدا با توجه به طرح اختلاط بتن مورد مطالعه در دو سناریو که جزئیات آن پیش‌تر در جدول (۵) آورده شده است، بر اساس فهرست بهای مصالح ساختمانی در سال ۸۹ به محاسبه‌ی هزینه‌های دو سناریو در سال مبدأ که تنها شامل هزینه‌ی مورد نیاز برای تولید یک متر مکعب بتن با طرح اختلاط مورد نظراست، پرداخته خواهد شد. در گام بعدی به‌منظور محاسبه‌ی هزینه‌ها در پایان عمر مفید بتن، هزینه‌های مربوط به تخریب، حمل و دفن نخاله و تولید مجدد بتن به هزینه‌ی به‌دست آمده در دوره‌ی قبل افزوده می‌گردد. این روند در پایان هر دوره از عمر مفید سازه (تا پایان عمر بهره‌برداری ۵۰ ساله) تکرار خواهد شده و هزینه‌ی نهایی به‌عنوان هزینه‌ی چرخه‌ی عمر سناریو در نظر گرفته خواهد شد. نتایج ارزیابی اقتصادی دو سناریوی مورد مطالعه در جدول (۱۳) آورده شده است:

جدول ۱۳ نتایج ارزیابی اقتصادی سناریوها

	در سال مبدأ t=۰	در پایان بهره‌برداری t=۵۰
هزینه‌ی چرخه‌ی عمر سناریوی اول (تومان)	۴۷,۱۵۰	۱۷۹,۱۲۳
هزینه‌ی چرخه‌ی عمر سناریوی دوم (تومان)	۸۸,۹۹۳	۱۹۸,۳۳۷
درصد کاهش هزینه‌ها	-٪۸۸	٪۱۰

*علامت منفی نشان‌دهنده افزایش اثرات است.

بنابر نتایج ارزیابی اقتصادی، با توجه به قیمت بالای نانوسیلیس، هزینه‌ی یک متر مکعب بتن حاوی ٪۱/۵ نانوسیلیس در سال مبدأ در مقایسه با بتن متعارف به میزان ۸۸ درصد افزایش نشان داد که تولید آن در کوتاه‌مدت توجیه‌پذیر نمی‌باشد. این در حالی است که با انجام ارزیابی اقتصادی یک متر مکعب بتن حاوی ٪۱/۵ نانوسیلیس در بلندمدت، هزینه‌ی چرخه‌ی عمر آن در مقایسه با یک متر مکعب بتن متعارف به میزان ۱۰ درصد کاهش یافت.

ارزیابی تلفیقی زیست‌محیطی- اقتصادی

پیش از انجام محاسبات، لازم به ذکر است که با توجه

به عدم انجام مطالعاتی در خصوص اهمیت اثرات زیست‌محیطی در ایران، میزان اهمیت دو اثر گرمایش جهانی و کاهش سوخت‌های فسیلی مطابق با توصیه‌ی انجمن ملی استاندارد و تکنولوژی امریکا در نظر گرفته شده است. هم‌چنین بر اساس مطالعات انجمن مذکور در کشورهای در حال توسعه از جمله ایران میزان وزن بعد محیط زیست و اقتصاد در ارزیابی تلفیقی برابر هم در نظر گرفته می‌شود [10]. با داشتن نمرات زیست‌محیطی و اقتصادی به‌دست آمده، نتایج حاصل از ارزیابی تلفیقی زیست‌محیطی- اقتصادی در سناریوی اول و دوم مطابق جدول (١٤) محاسبه خواهد شد:

جدول ١٤ نتایج ارزیابی تلفیقی

	سناریوی اول	سناریوی دوم
IAScorej1	٢/٦٢٦	١/٩٣٩
IAScorej2	٠/٠٤٢	٠/٠٣٨
EnvScorej	٢/٦٧	١/٩٨
LCC_j	١٧٩,١٢٣	١٩٨,٣٣٧
Scorej	٥٢/٨	٤٧/٦

با توجه به نمرات ارزیابی تلفیقی زیست‌محیطی- اقتصادی به‌دست آمده، بتن حاوی ١/٥٪ نانوسیلیس با نمره‌ی ٤٧/٦ در مقایسه با بتن متعارف با نمره‌ی ٥٢/٨، عملکرد بهتری را در درازمدت نشان داده‌است.

بحث و نتیجه‌گیری

از موانع موجود بر سر راه انجام ارزیابی زیست‌محیطی چرخه‌ی عمر در فناوری‌های نو ظهور و در حال گسترشی چون فناوری نانو، کمبود آگاهی از به‌کارگیری مفهوم چرخه‌ی عمر، کمبود اطلاعات در رابطه با ورودی و خروجی‌های سیستم و اثرات هر یک از آن‌ها می‌باشد. این امر باعث می‌شود که در اغلب موارد انجام LCA زمانی آغاز شود که فناوری مورد نظر به بلوغ رسیده باشد. با این وجود نظریه‌پردازان و دست‌اندرکاران LCA توافق دارند که اجرای LCA در آغاز یک فناوری، بهترین راه برای شناسایی زمینه‌های اصلی نگرانی در رابطه با اثرات بالقوه‌ی زیست‌محیطی است [14]. به‌عبارت دیگر می‌توان گفت، اگر چه فقدان اطلاعات کافی در انجام ارزیابی زیست‌محیطی در زمینه‌ی فناوری نانو یک مانع جدی محسوب می‌شود، اما اجرای LCA نباید تا زمان دسترسی به تمام داده‌ها به تأخیر بیفتد. به‌علاوه این رویکرد می‌تواند برای مقایسه‌ی عملکرد زیست‌محیطی چنین فناوری‌های جدیدی با فناوری‌های سنتی، مورد استفاده قرار گیرد. بدین منظور با توجه به ضرورت انجام یک ارزیابی در رابطه با تأثیر مصرف نانوسیلیس در بتن، در این مطالعه به ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی بتن حاوی نانوسیلیس پرداخته شده است. در این مطالعه به دلایل محدودیت داده‌های به‌دست آمده، عدم قطعیت در سرنوشت نهایی برخی از مواد و نحوه‌ی انجام ارزیابی آثار این آلاینده‌ها، شامل آثار جهانی می‌باشد که مطابق نتایج حاصل از ارزیابی تلفیقی زیست‌محیطی- اقتصادی صورت گرفته بتن حاوی ١/٥٪ نانوسیلیس با نمره‌ی ٤٧/٦ در مقایسه با بتن متعارف با نمره‌ی ٥٢/٨، عملکرد نسبتاً بهتری را در دراز مدت نشان داده است.

موضوع قابل تأمل دیگر در زمینه‌ی به‌کارگیری فناوری نانو، نگرانی و عدم اطمینان زیاد در رابطه با تأثیرات این فناوری بر سلامتی بشر و محیط‌زیست است. در ارزیابی اثرات زیست‌محیطی محصولات نانو به‌روش LCA، تأثیرات سمیت این ذرات مورد نظر قرار نمی‌گیرد، چرا که فرض بر این است که خطرات سمی بالقوه، امری است که توسط سایر مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی (شامل صرفه‌جویی در میزان مصرف مواد و انرژی) جبران نمی‌شود و لذا اگر مزایای نانو محصولات در طی چرخه‌ی عمر قابل توجه بود،

ارزیابی بیشتر در جهت استفاده‌ی گسترده از آن محصول باید ادامه یابد، در غیر این صورت بهتر است آن را متوقف کرد [14]. لذا به‌دلیل اثرات سمی بالقوه‌ی نانوسیلیس و اثرات ناشناخته‌ی آن در دوران بهره‌برداری از یک سو و اهمیت منافع کوتاه‌مدت در کنار منافع بلندمدت به‌منظور انتخاب گزینه‌ی بهینه در یک کشور در حال توسعه (مانند ایران) از سوی دیگر، با توجه به اختلاف اندک نمرات ارزیابی تلفیقی زیست‌محیطی- اقتصادی دو سناریو نمی‌توان بتن حاوی ۱/۵٪ نانوسیلیس را با قطعیت به‌عنوان گزینه‌ی مطلوب معرفی کرد و باید مصرف آن در بتن با تأمل بیشتری انجام شود.

مراجع

۱- قالیبافیان،م.، "توسعه‌ی پایدار و رسالت صنعت بتن و سیمان"، نشریه‌ی انجمن بتن ایران، شماره ۲۳، صفحه ۱۱، (۱۳۸۵).

۲- پیدایش،منصور، "بتن و تعامل آن با محیط‌زیست"، دومین کنفرانس بین‌المللی بتن و توسعه ،تهران، (۱۳۸٤).

۳- اردستانی،پیمان، "اثرات زیست‌محیطی استفاده از نانوسیلیس در بتن"،پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، (۱۳۸۷).

٤- رمضانیانپور، ع.، فیروزمکان، ش.، عبادی، ت.، بهرامی، ح.، "تأثیر نانوسیلیس بر خواص مکانیکی و دوام بتن"، ششمین کنگره‌ی مهندسی عمران، سمنان، (۱۳۹۰).

5- Sobolve, K., Flores, I., Hermosillo, R., Torres-Martinez, L., "Nanomaterials and Nanotechnology for High-Performance Cement Composites", *Journal of American Concrete Institute*, No. 254, pp. 93-129, (2006).

6- Tobon, J. L., Restrepo, O. J., Paya, J. ,"Comparative Analysis of Performance of Portland Cement Blended with Nano Silica and Silica Fume", Dyna Magazine, No.163, pp.37-48, (2010).

7- Karn, B., Woodrow, W., Aguar, P., "Nanotechnology and Life Cycle Assessment", US Environmental Protection Agency, Washington, D.C., (2007).

8- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G.Rydberg,T., Schmidt, W.P., Suh, S., Weidema, B.P., Pennington, D.W., "Life Cycle Assessment Part 1: Framework, Goal, Scope Definition, Inventory Analysis, and Applications", Environment International, No. 20, pp. 701-720, (2004).

9- Pennington, D.W., Potting, J., Finnveden, G., Lindeijer, E., Jolliet, O., Rydberg, T., Rebitzer, G., "Life Cycle Assessment Part 2: Current Impact Assessment Practice", Environment International, No.30, pp. 721–739, (2004).

10- Bement, A. L. "BEES3.0 Technical Manual and User Guide, Building for Environmental and Economic Sustainability", National institute of Standards & Technology, Technology Administration, US Department of Commerce, Gaithersburg, MD 20899-8603,(2002).

11- Lippiatt, B, "BEES4.0 Technical Manual and User Guide, Building for Environmental and Economic Sustainability", National institute of Standards & Technology, Technology Administration, U.S. Department of Commerce, Gaithersburg, MD 20899-8603,(2002).

۱۲- عرب، گلناز، "تهیه‌ی فهرست چرخه‌ی عمر بازیافت سرباره‌ی کارخانجات ذوب آهن به‌منظور جـایگزینی سـیمان از نقطـه‌نظـر مصـرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران،(۱۳۸۹).

13-"AkzoNobel Report-Environmental", Adopted from: http://www.akzonobel.com/eka. Access Date: (2009).

14- Barbara Karn, Woodrow Wilson, Pilar Aguar, "Nanotechnology and Life Cycle Assessment", US Environmental Protection Agency, Washington D.C., (2007).